

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 9 วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น 1

หัวข้อเนื้อหา

1. แหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น
2. วงจรเรียงกระแส
3. วงจรกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ
4. การรักษาระดับแรงดัน
5. การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง
6. การรักษาระดับแรงดันขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง
7. พื้นฐานวงจรรักษาระดับแรงดันเชิงเส้นแบบอนุกรม
8. วงจรรักษาระดับแรงดัน
9. วงจรป้องกันการลัดวงจรหรือวงจรป้องกันกระแสไหลเกินพิกัด
10. บทสรุป

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. นักศึกษามีทักษะการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น
2. นักศึกษามีทักษะการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดัน
3. นักศึกษามีทักษะการออกแบบวงจรป้องกันการลัดวงจรหรือวงจรป้องกันกระแสไหลเกิน

พิกัด

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
 - 1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
 - 1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
 - 1.3 วิธีสอนแบบปฏิบัติการ
 - 1.4 วิธีสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน
 - 2.1 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น
 - 2.2 แสดงตัวอย่างการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ และการออกแบบ
 - 2.3 ให้นักศึกษาทำแบบฝึกหัด
 - 2.4 ให้การบ้านกับนักศึกษา

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารคำสอนรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์ 1

2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และไฟโตบอร์ด
3. เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์
4. กระดานไวท์บอร์ด
5. โปรเจ็คเตอร์

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าเรียน
2. เอกสารปฏิบัติการ
3. การบ้าน
4. สอบกลางภาค
5. สอบปลายภาค

บทที่ 9

วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น 1

9.1 บทนำ

แหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายที่นิยมใช้มานานมาก ตั้งแต่ยุคแรกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จนมาถึงปัจจุบัน ซึ่งแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นนั้นมีข้อดีคือ มีความทนทานสูง ราคาถูก และสามารถจ่ายกระแสและแรงดันได้สูง ภาพที่ 9.1 แสดงไดอะแกรมของแหล่งจ่ายแรงดันประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า กระแสสลับ วงจรเรียงกระแส วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรักษาระดับแรงดัน

9.2 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส (rectifier) คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสไฟฟ้าไหลไปยังโหลดเพียงทิศทางเดียว ภาพที่ 9.2 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge rectifier) ซึ่งประกอบด้วยไดโอด D_1 ถึง D_4 การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่แรงดันด้านบวกเข้ามาที่อินพุตของวงจรไดโอดบริดจ์ ไดโอด D_2 และ D_3 ได้รับการไบแอสตรง (forward bias) ส่งผลให้ไดโอดนำกระแส ขณะที่ไดโอด D_1 และ D_4 ได้รับการไบแอสกลับ (reverse bias) ทำให้ไดโอดไม่นำกระแส กระแสจะไหลผ่านไดโอด D_2 R_L และ D_3 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_L ซึ่งมีลักษณะด้านบวก ขณะที่แรงดันด้านลบเข้ามาที่อินพุตของวงจรไดโอดบริดจ์ ไดโอด D_2 และ D_3 ได้รับการไบแอสกลับ และไดโอด D_1 และ D_4 ได้รับการไบแอสตรง ส่งผลให้กระแสจะไหลผ่านไดโอด D_4 , R_L และ D_1 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_L ซึ่งมีลักษณะพีคบวกอีกครั้ง การออกแบบวงจรไดโอดบริดจ์ควรพิจารณากระแสที่ไหลผ่านไดโอด และแรงดันไบแอสกลับที่ไดโอดสามารถทนได้ โดยการเลือกขนาดกระแสและขนาดแรงดันไบแอสกลับนั้นจะเลือกประมาณ 2 เท่าของกระแสที่ไหลผ่านโหลด และแรงดันไบแอสกลับสูงสุดซึ่งเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลง

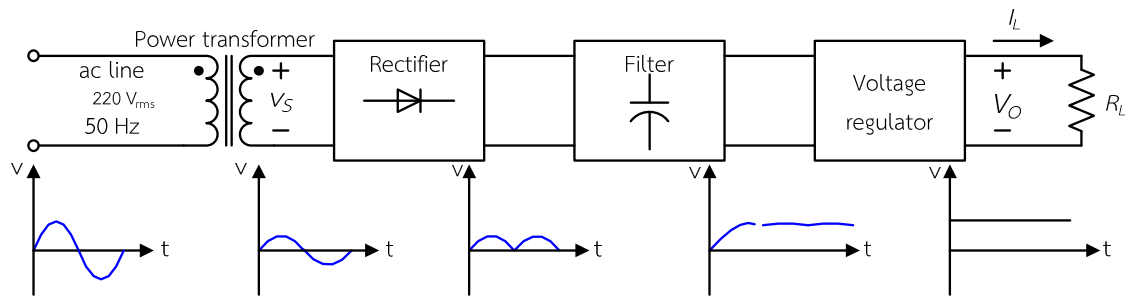
9.3 วงจรกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 9.3 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และตัวเก็บประจุกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (capacitor low-pass filter circuit) ภาพที่ 9.4 แสดงแรงดันเต็มคลื่นที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งแรงดันมีลักษณะระลอกคลื่น (ripple voltage: V_r) การหาค่าแรงดันระลอกคลื่นจะเริ่มจากการหาค่าแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีค่าเท่ากับ

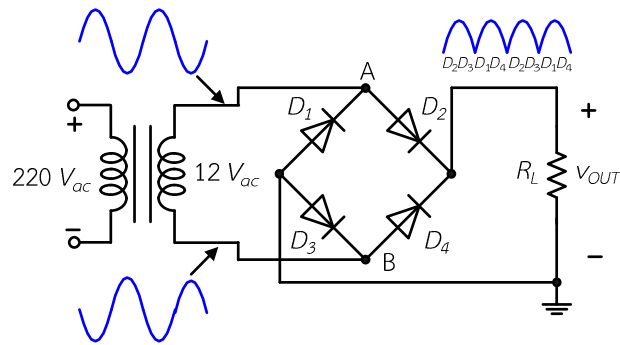
$$V_{OUT}(t) = V_m e^{-t'/R_L C_1} \quad (9.1)$$

แรงดัน V_L คือแรงดันต่ำสุดขณะตัวเก็บประจุคายประจุซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

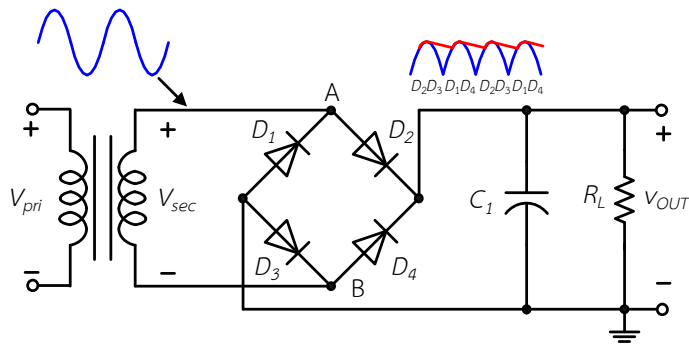
$$V_L = V_m e^{-T'/R_L C_1} \quad (9.2)$$



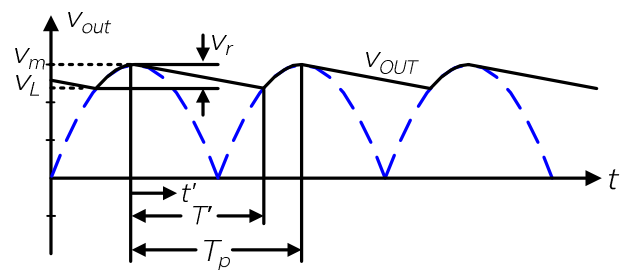
ภาพที่ 9.1 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายแรงดัน



ภาพที่ 9.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์



ภาพที่ 9.3 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และตัวเก็บประจุกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน



ภาพที่ 9.4 แรงดันเต็มคลื่นที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

แรงดันระลอกคลื่น V_r ที่เอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$V_r = V_m - V_L \quad (9.3)$$

จากสมการ 9.2 และ 9.3 สมการแรงดันระลอกคลื่นสามารถเขียนได้ว่า

$$V_r = V_m \left(1 - e^{-T'/R_L C_1} \right) \quad (9.4)$$

คาบเวลา T' มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ T_p ซึ่ง $T' \ll R_L C_1$ และ $T' = T_p$ จะได้ว่า

$$V_r \cong \frac{V_m T_p}{R_L C_1} \quad (9.5)$$

กำหนดให้คาบเวลา $T_p = 1/2f$ แรงดันระลอกคลื่นมีค่าเท่ากับ

$$V_r = \frac{V_m}{2fR_L C_1} \quad (9.6)$$

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าเท่ากับ

$$C_1 = \frac{V_m}{2fR_L V_r} \quad (9.7)$$

กรณีวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จากภาพที่ 9.3 จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลไปยังโหลดมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านไดโอดในวงจรเรียงกระแส ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านไดโอดสูงสุด $i_{D,peak}$ มีค่าเท่ากับ

$$i_{D,peak} \cong \frac{V_m}{R_L} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_m}{V_r}} \right) \quad (9.8)$$

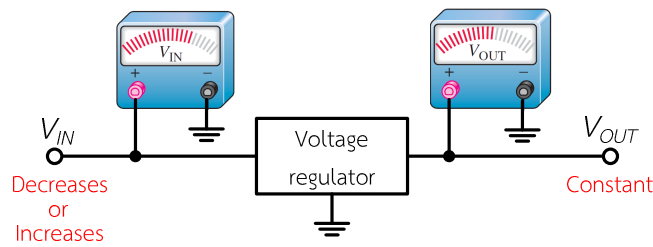
และกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเฉลี่ย $i_{D,avg}$ มีค่าเท่ากับ

$$i_{D,avg} = \frac{V_m}{\pi R_L} \sqrt{\frac{2V_r}{V_m}} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_m}{V_r}} \right) \quad (9.9)$$

ตัวอย่างที่ 9.1 กำหนดให้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน V_R ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและตัวเก็บประจุกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แรงดันสูงสุด $V_m = 10$ V ความถี่เท่ากับ 50 Hz กำหนดให้ $R_L = 10$ k Ω และ $V_r = 0.2$ V จงหาค่าความจุ C_1

วิธีทำ ค่าความจุ C_1 เขียนได้ว่า

$$C_1 = \frac{V_m}{2fR_L V_r} \quad (9.10)$$



ภาพที่ 9.5 บล็อกไดอะแกรมวงจรรักษาระดับแรงดัน

แทนค่า R_L , V_r , V_m และ f ค่าความจุมีค่าเท่ากับ

$$C_1 = \frac{10V}{2 \times 50\text{Hz} \times 10\text{k}\Omega \times 0.2V} = 50 \mu\text{F} \quad (9.11)$$

9.4 การรักษาระดับแรงดัน

วงจรรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation) หมายถึงวงจรทำหน้าที่รักษาค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่มากที่สุด ขณะที่แรงดันอินพุตหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง วงจรรักษาระดับแรงดันมีการทำงาน 2 ลักษณะดังนี้ 1) การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง (line regulation) และ 2) การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง (load regulation: LR)

9.5 การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง

การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง (line regulation) หมายถึงขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงวงจรสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่มากที่สุด ภาพที่ 9.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง แรงดันเอาต์พุตต้องคงที่ การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจะแสดงเป็นร้อยละของอัตราการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต แรงดันอินพุตมีย่านการเปลี่ยนแปลง การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงหาได้จากสมการ

$$\text{Line regulation} = \left(\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} \right) 100\% \quad (9.12)$$

การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงอยู่ในหน่วย %/V ได้ เช่น การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.05%/V ซึ่งหมายถึง เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง 1 V แรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง 0.05% การรักษาระดับแรงดันขณะที่แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงหาได้จากสมการ

$$\text{Line regulation} = \left(\frac{\Delta V_{OUT} / V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} \right) 100\% \quad (9.13)$$

ตัวอย่างที่ 9.2 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาที่อินพุตของวงจร แรงดันอินพุตลดลงเท่ากับ 5 V และแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเท่ากับ 0.25 V กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรต้องมีค่าเท่ากับ 15 V ให้หาเปอร์เซ็นต์ของการรักษาระดับแรงดัน

วิธีทำ การรักษาระดับแรงดัน (Line regulation) เขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Line regulation} &= \frac{(\Delta V_{OUT}/V_{OUT})}{\Delta V_{IN}} 100\% \\ &= \frac{(0.25\text{V}/15\text{V})100\%}{5\text{V}} = 0.333\%/V \end{aligned} \quad (9.14)$$

การรักษาระดับแรงดัน (Line regulation) ของวงจรมีค่าเท่ากับ 0.333%/V

9.6 การรักษาระดับแรงดันขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง

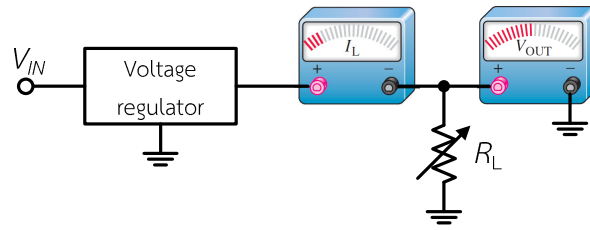
การรักษาระดับแรงดันขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง (load regulation: LR) หมายถึง เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนค่าความต้านทานวงจรสามารถรักษาระดับแรงดันด้วยวิธีการจ่ายกระแสเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ ภาพที่ 9.6 (ก) แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันขณะต่อตัวต้านทานเอาต์พุตซึ่งมีกระแสไหลค่าหนึ่งและเกิดแรงดันเอาต์พุต ภาพที่ 9.6 (ข) แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันขณะเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นหรือลดลง วงจรจะมีกระแสไหลไปยังโหลดเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \right) 100\% \quad (9.15)$$

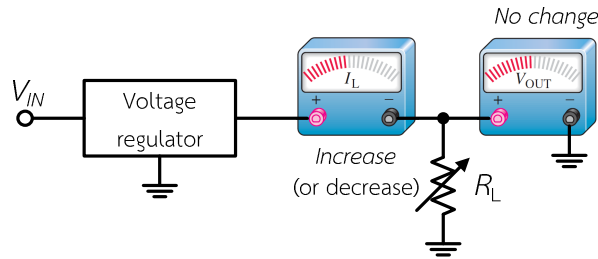
การรักษาระดับแรงดันที่โหลดสามารถแสดงได้ด้วยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตขณะที่กระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ค่าการรักษาระดับแรงดันที่โหลดเท่ากับ 0.01%/mA หมายถึงแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง 0.01% เมื่อกระแสที่โหลดเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 mA

การรักษาระดับแรงดันที่โหลด (load regulation: LR) สามารถนิยามได้จากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตสำหรับการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านโหลด การหาค่าการรักษาระดับแรงดันที่โหลดคือการหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตขณะไม่มีโหลดกับขณะมีโหลดซึ่ง

การเทียบเคียงค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรแหล่งจ่ายไฟด้วยวิธีการของวงจรเทียบเคียงเทวินิน ภาพที่ 9.7 แสดงวงจรเทียบเคียงเทวินินของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีการต่อโหลด แรงดันเทวินินคือแรงดันจากแหล่งจ่ายขณะที่วงจรไม่ต่อโหลด (V_{NL}) และค่าความต้านทานเทวินิน คือค่าความต้านทานเอาต์พุต (R_{OUT}) ซึ่งค่าความต้านทานอุดมคติเท่ากับศูนย์ ซึ่งค่าการรักษาระดับแรงดันที่โหลดเท่ากับ 0% แต่ในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทานเอาต์พุต (R_{OUT}) มีค่าน้อยมาก เมื่อวงจรต่อโหลด แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

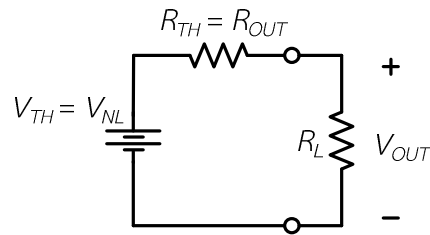


(ก)



(ข)

ภาพที่ 9.6 วงจรรักษาระดับแรงดัน (ก) โหลดไม่เปลี่ยนแปลงค่า และ (ข) โหลดเปลี่ยนแปลงค่า



ภาพที่ 9.7 วงจรเทียบเคียงเทวินินของแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีการต่อโหลด

$$V_{OUT} = V_{NL} \left(\frac{R_L}{R_{OUT} + R_L} \right) \tag{9.16}$$

ถ้าค่าความต้านทาน R_{FL} มีค่าความต้านทานน้อยสุด แรงดันเอาต์พุตขณะที่ต่อโหลดสูงสุด (V_{FL}) มีค่าเท่ากับ

$$V_{FL} = V_{NL} \left(\frac{R_{FL}}{R_{OUT} + R_{FL}} \right) \tag{9.17}$$

เขียนสมการ 9.16 เพื่อหาค่า V_{NL} ได้ว่า

$$V_{NL} = V_{FL} \left(\frac{R_{OUT} + R_{FL}}{R_{FL}} \right) \tag{9.18}$$

การรักษาระดับแรงดันที่โหลดมีค่าเท่ากับ

$$\text{Load regulation} = \frac{V_{FL} \left(\frac{R_{OUT} + R_{FL}}{R_{FL}} \right) - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (9.19)$$

$$= \left(\frac{R_{OUT} + R_{FL}}{R_{FL}} - 1 \right) \times 100\% \quad (9.20)$$

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{R_{OUT}}{R_{FL}} \right) \times 100\% \quad (9.21)$$

จากสมการ 9.21 ค่าการรักษาระดับแรงดันที่โหลดเท่ากับอัตราส่วนของค่าความต้านทานของโหลดและค่าความต้านทานของโหลดที่ต่ำสุดที่กำหนดไว้

ตัวอย่างที่ 9.3 เพื่อต้องการรักษาระดับแรงดันที่โหลดเท่ากับ 12 V ขณะที่ไม่มีการโหลด ($I_L = 0$) เมื่อต่อโหลดจะมีกระแสไหล 10 mA แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 11.9 V จงหาค่าการรักษาระดับแรงดันที่บอกเป็นร้อยละจากไม่มีโหลดไปยังมีโหลดเต็มที่ และร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตขณะไม่มีโหลด

วิธีทำ ขณะที่วงจรไม่ต่อโหลด แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{NL} = 12 \text{ V}$$

ขณะที่วงจรต่อโหลด แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{FL} = 11.9 \text{ V}$$

ค่าการรักษาระดับแรงดันที่โหลดจากไม่มีโหลดไปถึงมีโหลดเต็มที่เท่ากับ

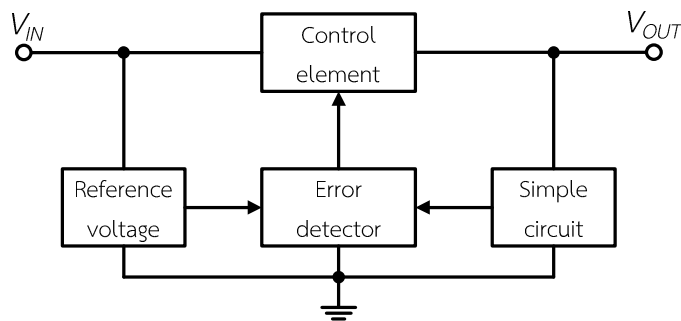
$$\begin{aligned} \text{Load regulation} &= \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \right) 100\% \quad (9.22) \\ &= \left(\frac{12\text{V} - 11.9\text{V}}{11.9\text{V}} \right) 100\% = 0.84\% \end{aligned}$$

กระแสเอาต์พุตจากไม่มีโหลดไปยังมีโหลดเต็มที่เท่ากับ 10 mA ซึ่งค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตเท่ากับ

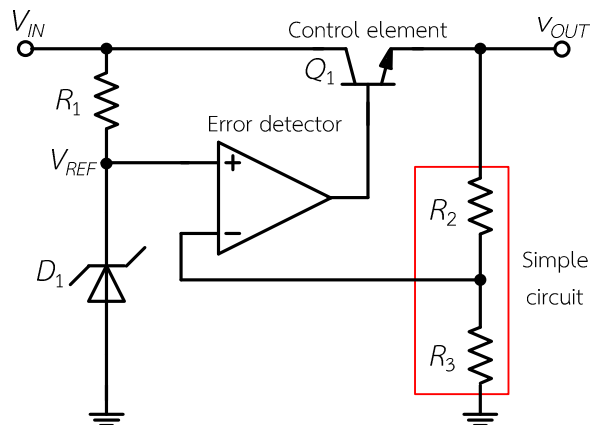
$$\text{Load regulation} = \frac{0.84\%}{10\text{mA}} = 0.084\% / \text{mA}$$

9.7 พื้นฐานวงจรรักษาระดับแรงดันเชิงเส้นแบบอนุกรม

ภาพที่ 9.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมแหล่งจ่ายแรงดันเชิงเส้นแบบอนุกรม ซึ่งประกอบด้วย วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงทำหน้าที่สร้างแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรตรวจจับความผิดพลาด วงจรตรวจจับแรงดันเอาต์พุตป้อนกลับจะทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงแล้วป้อนให้กับวงจรตรวจจับความผิดพลาด ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ผลของความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจะถูกป้อนให้กับวงจรควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่



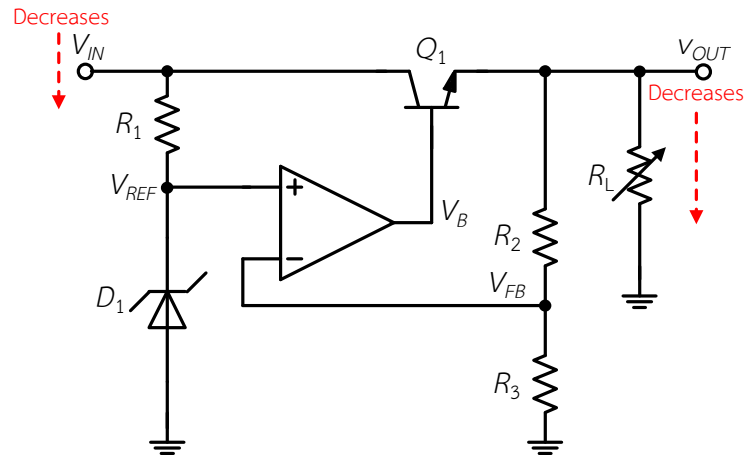
ภาพที่ 9.8 บล็อกไดอะแกรมแหล่งจ่ายแรงดันแบบรักษาระดับด้วยการป้อนกลับ



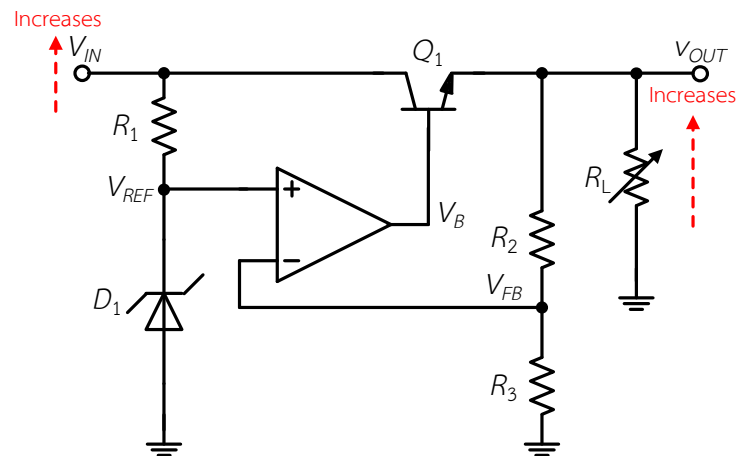
ภาพที่ 9.9 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม

9.8 วงจรรักษาระดับแรงดัน

ภาพที่ 9.9 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation circuit) แบบอนุกรม ซึ่งวงจรประกอบด้วย ตัวต้านทาน R_1 และซีเนอร์ไดโอด D_1 ต่อเป็นวงจรรักษาระดับแรงดันอ้างอิง ที่ป้อนแรงดันเข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ ออปแอมป์ทำหน้าที่ตรวจจับค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ตัวต้านทาน R_3 และ R_4 ต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดันซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันเอาต์พุตเพื่อป้อนเข้าขาลบของออปแอมป์ และทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ต่ออนุกรมระหว่างอินพุตและเอาต์พุตซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลด วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมจะอาศัยหลักการทํางานลักษณะการป้อนกลับแบบลบ เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงตามที่ต้องการ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9.10 (ก) ขณะที่แรงดันอินพุตหรือเอาต์พุตลดลง และ (ข) ขณะที่แรงดันอินพุตหรือเอาต์พุตเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 9.10 (ก) แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมขณะที่แรงดันอินพุตหรือเอาต์พุตลดลง ซึ่งหลักการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแรงดันเอาต์พุตลดลงเนื่องมาจากแรงดันอินพุตลดลงหรือเกิดจากการต่อโหลดแล้วทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตจะถูกแบ่งแรงดันซึ่งเป็นแรงดันป้อนกลับมีค่าเท่ากับ V_{FB} และถูกป้อนกลับเข้าที่ขาลบของออปแอมป์มีค่าน้อยกว่าแรงดันซีเนออร์ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง V_{REF} ที่ขาบวกของออปแอมป์ แรงดันผลต่างระหว่างแรงดัน V_{REF} กับแรงดัน V_{FB} จะถูกขยายโดยออปแอมป์ แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ V_B มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันที่ถูกป้อนกลับ V_{FB} มีค่าเท่ากับแรงดัน V_{REF} ซึ่งวงจรจะทำงานในลักษณะป้อนกลับแบบลบ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ของวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมจะมีความร้อนสูงมาก ดังนั้น ทรานซิสเตอร์ Q_1 จำเป็นต้องติดฮีตซิงก์เพื่อระบายความร้อน

ภาพที่ 9.10 (ข) แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมขณะที่แรงดันอินพุตหรือเอาต์พุตเพิ่มขึ้น หลักการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นหรือเกิดจากการต่อโหลดแล้วทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับเป็นแรงดัน V_{FB} มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง V_{REF} แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์จะมีค่าลดลง ส่งผลให้แรงดันที่ขาอีมิเตอร์ลดลงจนกระทั่งแรงดัน V_{FB} มีค่าเท่ากับแรงดัน V_{REF} ด้วยลักษณะการป้อนกลับแบบลบจะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ ซึ่งอัตราขยายลูปปิดของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A_{cl} = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (9.23)$$

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตจากวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม ซึ่งไม่พิจารณาแรงดัน V_{BE} ของ Q_1 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} \cong \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) V_{REF} \quad (9.24)$$

จากสมการที่ 9.29 สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับแรงดันซีเนอร์ไดโอด และตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต

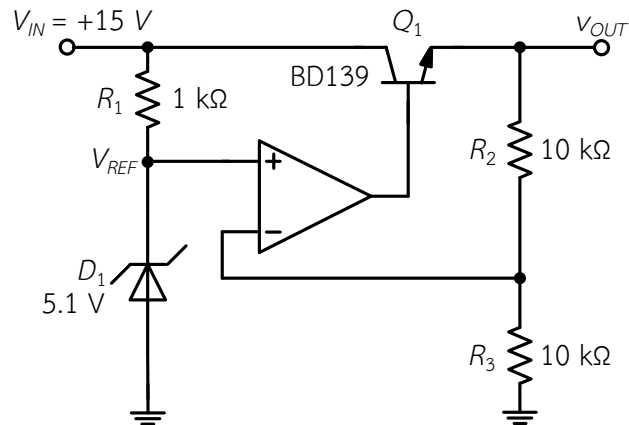
ตัวอย่างที่ 9.4 จงหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดันในภาพที่ 9.11

วิธีทำ แรงดันซีเนอร์ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง $V_{REF} = 5.1 \text{ V}$ แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

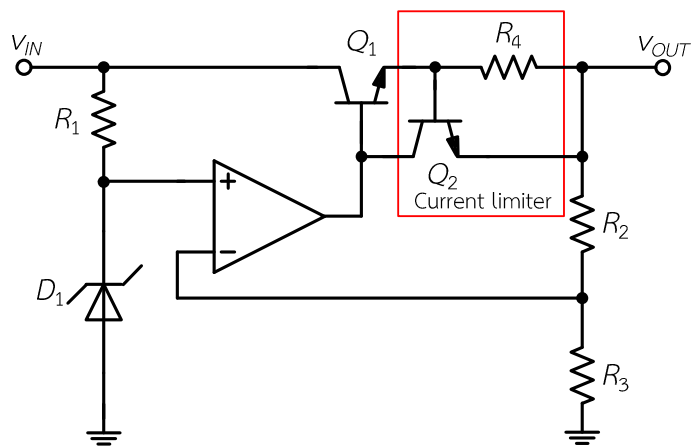
$$\begin{aligned} V_{OUT} &\cong \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) V_{REF} \\ &\cong \left(1 + \frac{10\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} \right) \times 5.1\text{V} = 10.2\text{V} \end{aligned} \quad (9.25)$$

9.9 วงจรป้องกันการลัดวงจรหรือวงจรป้องกันกระแสไหลเกินกำหนด

การนำวงจรไฟเลี้ยงหรือรักษาระดับแรงดันไปใช้งาน หากวงจรถูกต่อกับโหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำหรือโหลดต้องการกระแสสูงมากกว่าที่ออกแบบไว้ วงจรอาจเกิดการพังเสียหายได้ ดังนั้น วงจรไฟเลี้ยงจำเป็นต้องถูกออกแบบให้ป้องกันการจ่ายกระแสเกินกว่าที่ออกแบบไว้หรือป้องกันการลัดวงจร ภาพที่ 9.12 แสดงวงจรไฟเลี้ยงหรือรักษาระดับแรงดันที่มีการต่อวงจรป้องกันการลัดวงจรหรือวงจรป้องกันกระแสไหลเกินพิกัด (short-circuit protection or overload protection) หรือวงจรกำหนดกระแส (constant-current limiting) เพิ่มเข้าไประหว่างขาอีมิเตอร์ และเอาต์พุต วงจรประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_2 และ ตัวต้านทาน R_4



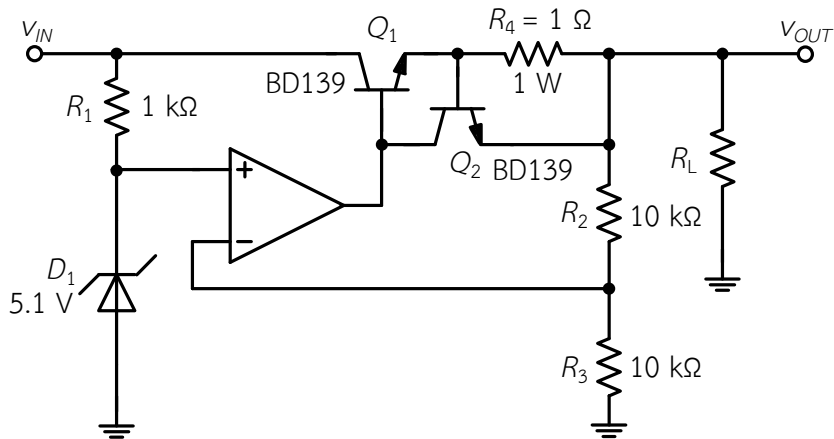
ภาพที่ 9.11 วงจรรักษาแรงดันแบบอนุกรม



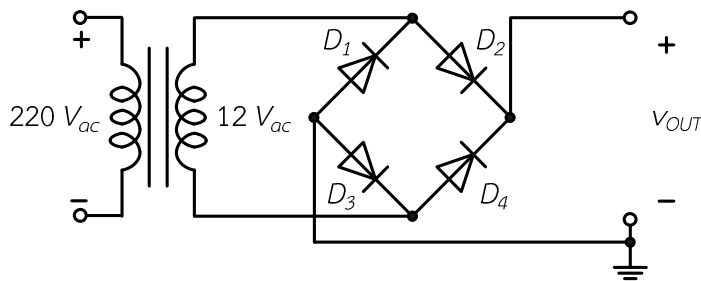
ภาพที่ 9.12 วงจรรักษาแรงดันแบบอนุกรมที่เพิ่มวงจรป้องกันกระแสเกิน

หลักการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อกระแสไหลผ่าน R_4 จะเกิดแรงดันที่ตกคร่อม R_4 หรือแรงดัน V_{BE2} ที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 เมื่อกระแสไหลมากขึ้นจนถึงค่าที่ออกแบบไว้สูงสุด แรงดันที่ตกคร่อม R_4 ที่มากพอให้เกิดการไบแอสตรงให้กับรอยต่อขาเบสกับอิมิตเตอร์ของ Q_2 ทรานซิสเตอร์ Q_2 เริ่มนำกระแส ออปแอมป์จะจ่ายกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 ขณะเดียวกัน กระแส I_B ที่ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ลดลง ส่งผลให้กระแสเอาต์พุตที่ไหลผ่าน Q_1 แล้วที่จ่ายให้โหลดลดลง เนื่องจากแรงดัน V_{BE} ที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 ไม่เท่ากับ 0.7 V กระแสที่ไหลผ่านโหลดมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_4 เพิ่มขึ้น กระแสที่ไหลผ่านโหลดสูงสุดเท่ากับ

$$I_{L(\max)} = \frac{0.7V}{R_4} \quad (9.26)$$



ภาพที่ 9.13 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมที่เพิ่มวงจรป้องกันกระแสเกินตัวอย่างที่ 9.5



ภาพที่ 9.14 วงจรเรียงกระแส

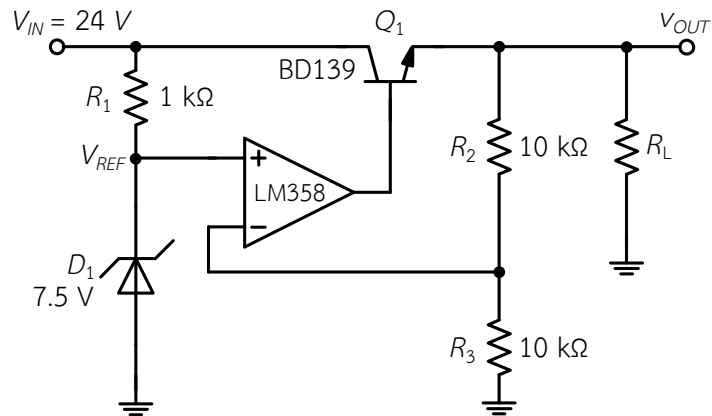
ตัวอย่างที่ 9.5 ภาพที่ 9.13 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีวงจรป้องกันการลดทอนกราวด์ ให้หาค่ากระแสเอาต์พุตที่ไหลสูงสุดที่สามารถจ่ายให้โหลดได้

วิธีทำ กระแสที่ไหลผ่าน R_4 มีค่าเท่ากับ

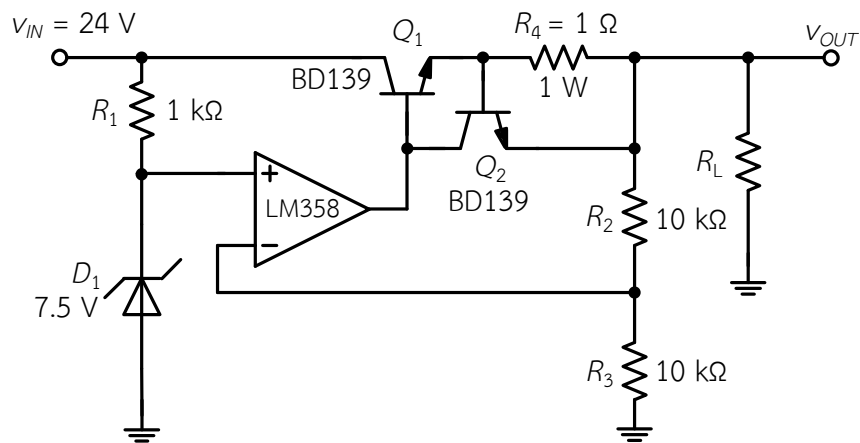
$$I_{L(max)} = \frac{0.7V}{R_4} = \frac{0.7V}{1\Omega} = 0.7A \tag{9.27}$$

9.11 บทสรุป

บทนี้กล่าวถึงวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแบบเชิงเส้นที่ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดบริดจ์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีลักษณะเต็มคลื่น ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองแรงดันให้คงที่ ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่จ่ายแรงดัน และกระแสไฟฟ้า และออปแอมป์ทำหน้าที่ควบคุมทรานซิสเตอร์ให้จ่ายแรงดันเอาต์พุตตามที่ออกแบบไว้ คุณลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแบบเชิงเส้นที่สำคัญคือ Line regulation และ Load regulation การป้องกันการลัดสามารถทำได้ด้วยการต่อทรานซิสเตอร์เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับ และป้องกันการลัดวงจร ในบทนี้มีส่วนการทดลองเพื่อให้นักศึกษามีทักษะการต่อวงจร และศึกษาการทำงานของวงจรเพิ่มเติมได้ นักศึกษาสามารถนำความรู้ที่ได้การศึกษาในบทนี้ไปออกแบบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงใช้งานได้



ภาพที่ 9.15 วงจรรักษาแรงดัน



ภาพที่ 9.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟที่เพิ่มวงจรป้องกันการลัดวงจร

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. แรงดัน ripple จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์อะไร ให้บอกเหตุผลประกอบ
2. แรงดันเอาต์พุตของวงจรรักษาแรงดันขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์อะไร ให้บอกเหตุผลประกอบ
3. กระแสเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 9.15 จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์อะไร ให้บอกเหตุผลประกอบ
4. จากภาพที่ 9.16 ตัวต้านทาน R_4 มีไว้เพื่ออะไร
5. ให้อธิบายหลักการทำงานของวงจรป้องกันการลัดวงจร
6. กำหนดให้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน V_R ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นและตัวเก็บประจุกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แรงดันสูงสุด $V_m = 12 \text{ V}$ ความถี่เท่ากับ 50 Hz กำหนดให้ $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ และ $V_r = 0.4 \text{ V}$ จงหาค่าความจุ C_1
7. จากข้อ 1 ถ้าเปลี่ยนวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ค่าความจุ C_1 มีค่าเท่าไร
8. กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรต้องมีค่าเท่ากับ 20 V ขณะที่แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.5 V และแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.2 V ให้หาเปอร์เซ็นต์ของการรักษาแรงดัน

9. วงจรรักษาระดับแรงดันขณะไม่มีโหลด แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 18 V และขณะมีโหลดเต็มที่ แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 17.8 V และกระแสเอาต์พุตที่จ่ายให้โหลดเท่ากับ 50 mA ให้หาการรักษาระดับแรงดันที่บอกเป็นร้อยละจากไม่มีโหลดไปยังมีโหลดเต็มที่ และร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต
10. จากตัวอย่างที่ 9.4 ถ้าเปลี่ยนแรงดันซีเนอร์เท่ากับ 3.3 V $R_1 = 1.8 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 18 \text{ k}\Omega$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ใช้เบอร์ BD139 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่าไร
11. จากตัวอย่างที่ 9.5 ถ้าเอาต์พุตของวงจรลดกราวด์ ให้หาค่ากระแสเอาต์พุตที่ไหลลงกราวด์

